

Matti Heikkinen

Äänentasomittari

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ja liikenteen ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Kevät 2008



Kajaanin
ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Matti Heikkinen	
Työn nimi Äänentasomittari	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Sulautetut järjestelmät	Ohjaaja(t) Jukka Heino Toimeksiantaja Ismo Talus
Aika Kevät 2008	Sivumäärä ja liitteet 30 + 4
<p>Insinööritöiden tarkoituksena oli rakentaa äänentasomittari Kajaanin ammattikorkeakoulun tuotantolaboratorion CNC-jyrsimelle. Äänentasomittarin tarkoituksena tulisi ilmaista, milloin melun taso nousee yli 85 dB:n rajan. Mittari ilmoittaa ledeillä tehdyn kuvan avulla, milloin jyrsimen käyttäjän tulisi ottaa kuulosuojaus käyttöön.</p> <p>Tavoitteena olisi, että äänentasomittari mittaisi 83 - 86 desibelin tarkkuudella ja se olisi ladattava. Mittari koostuu pääasiassa kahdesta elektroniikkaosiesta. Ensimmäinen osio sisältää varsinaisen mittarin ja toinen osio sisältää akkujen latauksen. Mikrofonilta tuleva signaali vahvistetaan LM358-operaatiovahvistinkytkennällä, jonka jälkeen signaali lähetetään AD-muuntimelle joka muuttaa signaalin digitaalseksi. Mittaria ohjataan AT89S52-mikrokontrollerilla, jonka sisältä löytyy C-kielinen ohjelma. Ohjelma kerää AD-muuntimelta tulevia lukuja, joista lasketaan lopuksi keskiarvo. Keskiarvon perusteella mittari osaa ohjata ledejä. Akkujen latausta ohjataan MAX712-piirin ympärille rakennetulla kytkennällä.</p> <p>Äänentasomittaria testattiin CNC-jyrsimen luona. Mittari saatiin toimimaan halutulla tavalla. Testauksessa oli mukana myös digitaalinen desibelimittari, jonka avulla saatiin säädettyä äänentasomittari tavoitteena olleisiin arvoihin.</p> <p>Työssä saatiin tehtyä suunnitelmien mukainen äänentasomittari.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Äänentasomittari, akku
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Matti Heikkinen	
Title A Sound Level Meter	
Optional Professional Studies Embedded Systems	Instructor(s) Jukka Heino
	Commissioned by Ismo Talus
Date March 28, 2008	Total Number of Pages and Appendices 30 + 4
<p>The purpose of this Bachelor's was to build a sound level meter for the CNC router in the production laboratory of the Kajaani University of Applied Sciences. The sound level meter is supposed to indicate when the noise level rises over 85 dB. The meter will show via a picture made by LEDs when the user of the cutter should wear the ear protectors.</p> <p>The target of the sound level meter is to measure at the 83 – 86 decibel level. It should also be recharged. The meter mainly consists of two electronic sectors. The first sector contains the proper meter and the second one contains the recharge of the batteries. The signal from the microphone is reinforced by the LM358 operative amplifier first. Then the signal will be sent to the AD converters which change the signal into digital. The meter is instructed by the AT89S52 microcontroller inside of which there is a C language program. The program gathers numbers from the AD converter. The program counts the average value of these numbers. By using this average value the meter can instruct the LEDs. The recharge of the batteries is instructed by a circuit which is built around the MAX712 chip.</p> <p>The sound level meter was tested with a CNC router and after some trimming the meter worked in the way it was supposed to. A digital decibel meter was also included in testing. With the help of this digital decibel meter, it was easy to calibrate the sound level meter to the target values.</p>	
Language of Thesis Finnish	
Keywords	Sound level meter, battery
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Insinööritoiminnan aiheena oleva äänentasonmittari on koulun piirilevyjyrsimen melun aiheuttama idea. Äänentasonmittarista jyrsimen käyttäjä huomaa milloin tulisi käyttää kuulosuojasta jyrsimisen aikana.

Haluan kiittää idean keksijää/tilaajaa Ismo Talusta ja ohjaajaa Jukka Heinoa. Työn kielellisestä ohjauksesta haluan kiittää Eero Soinista ja Kaisu Korhosta.

Kajaanissa 28.3.2008

Matti Heikkinen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 ÄÄNIAALLOT JA TAAJUUS	2
2.1 Äänenvoimakkuus	3
2.2 Äänenpaineasteikko	4
3 MIKROFONIT	5
3.1 Kondensaattorimikrofoni	6
3.2 Elektreettimikrofoni	7
4 MARKKINOILLA OLEVAT ÄÄNENTASOMITTARIT	8
4.1 Yleistä	8
4.2 Perusäänentasomittari, tyyppi 2240	8
4.3 Kehittyneempi äänentasomittari, tyyppi 2270	10
5 AKKUTEKNIikka	12
5.1 Yleistä	12
5.2 Ni-MH vastaan Ni-Cd	13
5.3 Akkujen latausprosessi	14
5.4 Uuden akun käyttöönotto ja erilaiset latauspiirit	16
6 ÄÄNITASOMITTARIN TOTEUTUS	18
6.1 Vahvistinkytkentä	18
6.2 AD-muunninkytkentä	19
6.3 Prosessorikytkentä, johon on liitettyä ledit	20
6.4 Laturikytkentä	21
7 PIIRILEVYN SUUNNITTELU JA SYÖVYTYS	23
7.1 Piirilevyn suunnittelu	23
7.2 Piirilevyn syövytys	23
8 OHJELMA	24
8.1 Vuokaavio	25
9 TESTAUS	26

9.1 Äänentasomittarikytkennän testaus	26
9.2 Laturi-kytkennän testaus	26
10 LOPPUANALYYSI	28
11 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Insinööriyön tarkoituksena oli rakentaa äänentasomittari Kajaanin ammattikorkeakoulun tuotantolaboratorion CNC-jyrsimelle. Idea mittarin rakentamiseen syntyi Kajaanin ammattikorkeakoulun laboratorioinsinöörille Ismo Talukselle jyrsimen suuren melun myötä. Tavoitteena oli rakentaa äänentasomittari, joka olisi halvempi kuin markkinoilla olevat mittarit. Mittarin tuli olla myös kannettava kuten markkinoilla olevat mittarit. Varsinaista eroa haluttiin hakea ladattavuuden kautta paristollisiin mittareihin nähden.

Desibeli on skalaari eli dimensioton yksikkö, joka vertailee suureiden suhteita logaritmisella asteikolla. Äänentasomittari mittaa piirilevyjyrsimen aiheuttamaa äänenpaineentasoa ja ilmaisee, milloin taso on liian korkea. Äänenpainetta mitataan kondensaattorimikrofonin avulla, joka syöttää pienitasoista signaalia, jota vahvistetaan operaatiovahvistimella toteutetulla vahvistimella.

Mittari koostuu periaatteessa kahdesta osiosta. Ensimmäinen osio sisältää äänenpaineitasomittauksien kannalta tärkeimmät komponentit. Mikrofonilta tuleva signaali vahvistetaan ensin, jonka jälkeen signaalia syötetään AD-muuntimen kautta prosessorille. Prosessorin sisällä olevalla koodilla ohjataan ledejä, jotka näyttävät, milloin tulee käyttää kuulosuojusta. Toisessa osiossa on akkujen lataukseen liittyvä kytkentä, joka on toteutettu MAX712-piirillä.

2 ÄÄNIAALLOT JA TAAJUUS

Värähtelemään saatu kappale aiheuttaa esimerkiksi ilmassa paineenvaihtelua eli pienten hiukkasten tihentymiä ja harventumia. Äänen voimakkuuteen vaikuttaa paineenvaihtelu. Äänen voimakkuus kasvaa paineenvaihtelun kasvamisen myötä. Paineenvaihtelun myötä aiheutuneen ilmahiukkasten tiheytyminen nostaa äänentaajuutta korkeammalle. [1, s. 9.]

Taajuuden mittayksikkö on hertsi (Hz). Kappale, joka värähtelee nopeammin kuin 20 kertaa sekunnissa, on ihmisen kuuloalueella. Jos värähtelyn taajuus on yli 20000 Hz, ihmisen kuuloalue ei pysy enää mukana. Kuuloalueen yli menevät taajuudet ovat jo ultraääniä, joita käytetään esimerkiksi lääketieteessä. Taajuusalue, minkä ihminen parhaiten kuulee, on 2000 - 4000 Hz. [1, s. 10.]

Ihmisen puheen selkeyden kannalta tärkein taajuusalue on 2 - 8 kHz. Kyseistä taajuuskaistaa kutsutaan preesensalueeksi. Ääni etenee ilmassa noin 340 m/s. Paineenvaihtelun aiheuttama etenemisliike ilmahiukkasissa ei ole kuitenkaan yhtä nopeaa. Ilmamolekyylit värähtelevät paikoillaan eivätkä kulje ääniaallon mukana. Kappaleen lähettämä värähtely ei saavu korvan tärykalvolle samanlaisena kuin se on lähtiessään liikkeelle, koska ääniaalto muuttuu edetessään. Matalat äänet kuuluvat kauas, ja korkeat äänet, joilla on lyhyt aallonpituus, vaimentuvat esteisiin helpommin. [1, s. 10.]

Äänen tutkimiseen voidaan käyttää spektrianalyysiä. Kuvassa 1 on esitetty Helmholtzin resonaattori, joka on ensimmäisiä äänianalysointilaitteita, joilla voidaan tutkia ääntä. Resonaattori on pullon muotoinen, ja se resonoi omalla taajuudellaan. Nykyään äänen analysointiin käytetään suodatin- tai FFT-menetelmiä. [2]



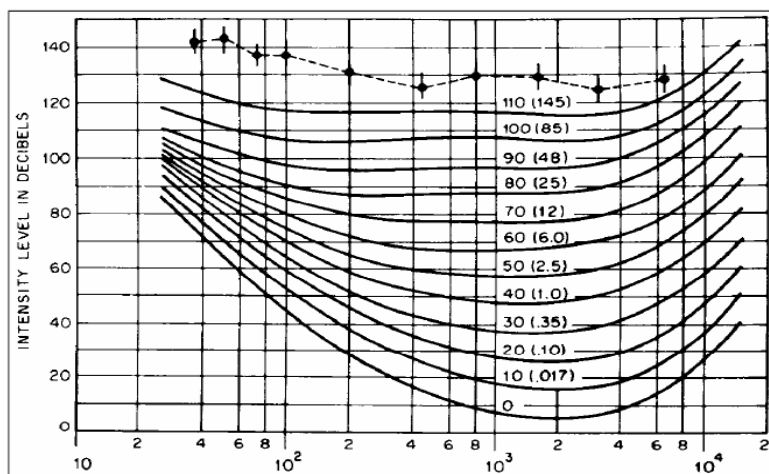
Kuva 1. Helmholtzin resonaattori. [2]

2.1 Äänenvoimakkuus

Äänenvoimakkuuden yksikkönä käytetään Bel-yksikköä, käytännössä sen kymmesosaa, desibeliä (=dB). Bel-yksikkö on nimetty Alexander Graham Bellin mukaan, joka tunnetaan puhelimen keksijänä. Akustiikassa esiintyy lukuja, joiden suuruudet vaihtelevat merkittävästi, voidaan desibeliyksiköillä ilmaista niitä paremmin. Desibelien ja taajuuksien yhteydessä on yleensä käytetty logaritmista asteikkoa. Kuvassa 2 on esitetty äänen kuuluminen taajuuden funktiona. [1, s. 11.]

Esim. Vakioäänekkyyskäyrästä

Äänen kuuleminen taajuuden funktiona

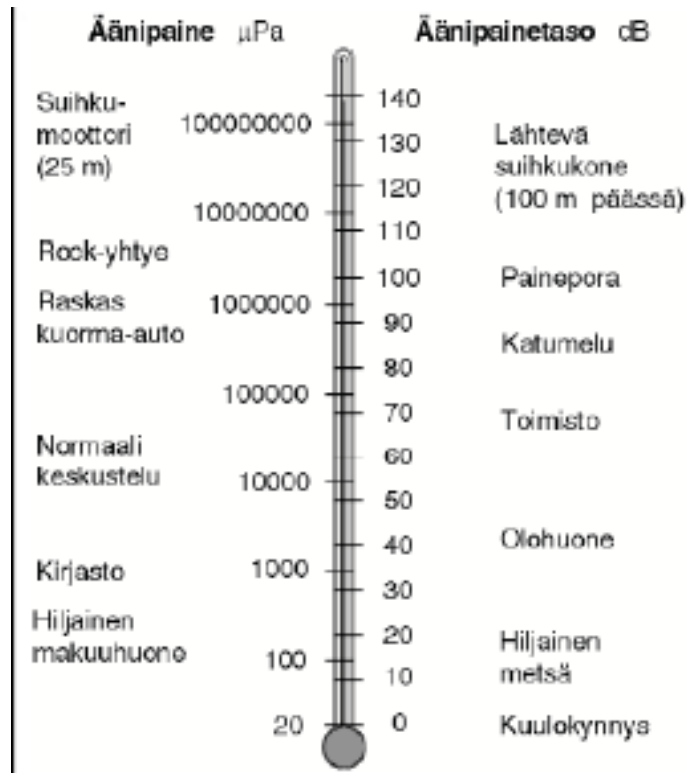


Kuva 2. Äänen kuuleminen taajuuden funktiona. [2]

Desibelimäärät eivät ilmaise sinänsä äänen absoluuttista voimakkuutta. Desibelit ovat vain lukujen suhteita. Ihminen havaitsee äänenvoimakkuudenlisäyksen, jos voimakkuuseroa on syntynyt kolme desibeliä. Jos äänenvoimakkuudenlisäys nousee noin kymmenen desibeliä, määrä vastaa kuuloaistimusvoimakkuuden kaksinkertaistumista. Jos voimakkuustaso halutaan kaksinkertaiseksi, on äänenteho kasvatettava kymmenkertaiseksi. [1, s. 12.]

2.2 Äänenpaineasteikko

Desibelien määrä ilmaisee mitatun äänen tehon suhteessa valittuun vertailuarvoon, joka on yleensä $20 \mu\text{Pa}$. Kuvassa 3 on äänenpaineasteikko, jossa on erilaisia ääniä eri voimakkuuksilla. Asteikon viitearvona on 0 dB, joka on pienin ääni, minkä ihminen pystyy kuulemaan 1 kHz:n taajuudella. Joidenkin testien mukaan kyseinen taso olisi 6,5 desibeliä suurempi. [1, s. 13.]



Kuva 3. Äänenpaineasteikko. [2]

3 MIKROFONIT

Mikrofoni on toiminnaltaan komponentti, joka muuttaa ilmanpaineen vaihtelun sähkövirrassa muuttuvaksi vaihteluksi. On sovittu maailmanlaajuisesti viitearvot, joiden avulla voidaan äänten keskinäisiä voimakkuussuhteita vertailla sähköisten ominaisuuksien mukaan. Mikäli äänen nauhoittamiseen käytetään mikrofonia, on olemassa seuraavanlainen sääntö: Nauhurissa kuuden desibelin lisäys tarkoittaa mikrofoniin kohdistuvan äänenpaineen kaksinkertautumista. Etäisyys äänilähteen ja mikrofoniin välillä vaikuttaa olennaisesti nauhoituksen laatuun. Jos äänilähteen etäisyys mikrofoniin kasvaa kaksinkertaiseksi, äänenpaineentaso laskee puoleen edellisestä. Kyseinen asia näkyy nauhurissa kuuden desibelin erona. [1, s. 14.]

Hiilimikrofoni on ensimmäinen todella helppokäyttöinen mikrofoni. Rakenteeltaan mikrofoni sisältää metallikalvolla päällystetyn kupin, jonka sisällä on hiilirakeita. Taajuuskaista riitti mikrofoniin aina 1900-luvun puoliväliin asti. [2]

Kidemikrofonissa on hiilirakeet korvattu pietsokiteellä. Pietsokiteen toiminta perustuu ilmiöön, jossa kiteen pinnoille muodostuu jännite mekaanisen jännityksen aiheuttamana. Kidemikrofonin hyvinä puolina oli, että vahvistinasteita ei tarvinnut kuin yksi tai kaksi. Transistorin yleistymisen myötä kidemikrofoni menetti valta-asemansa. [2]

Dynaamisen mikrofoniin toiminta perustuu kelaan, joka liikkuu magneettinapojen välissä. Kelan päihin syntyy jännitteen vaihtelua, joka vastaa ääniaaltojen vaihtelua. Mikrofoni on edelleen hyvin suosittu malli. [2]

3.1 Kondensaattorimikrofoni

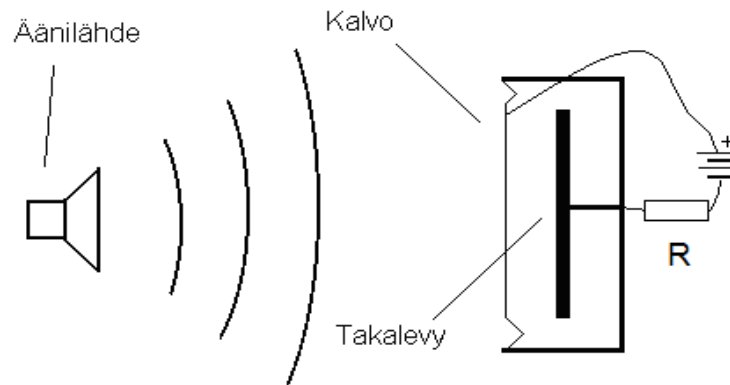
Kondensaattorimikrofonit luokitellaan yleensä hyvin korkealuokkaisiksi. Mikrofonit sisältää ohuen sähköä johtavan kalvon, joka on asennettu likelle kiinteää metallilevyä. Metallilevy ja kalvo muodostavat yhdessä kondensaattorin. Kun ääniaallot liikuttavat mikrofonin kalvoa, metallilevyn ja kalvon etäisyys ja kapasitanssi muuttuu. Ääniaaltojen liikkumisen myötä tapahtuneet muutokset muutetaan kuormitusvastuksella jännitteeksi, joka johdetaan eteenpäin. Mikrofonin erittäin suuren sisäisen vastuksen ja kapasitanssin pienien vaihteluiden vuoksi vahvistin pitää rakentaa mikrofonin yhteyteen. Etäisyyden ja kapasitanssin muuttuessa kondensaattorimikrofoni tarvitsee aina virtalähteen toimiakseen. Kuvassa 4 on esitetty kondensaattorimikrofonin rakenne. [3]

Vahvuudet:

- Herkkä (huomioi myös herkät taajuudet)
- Laadukas

Heikkoudet:

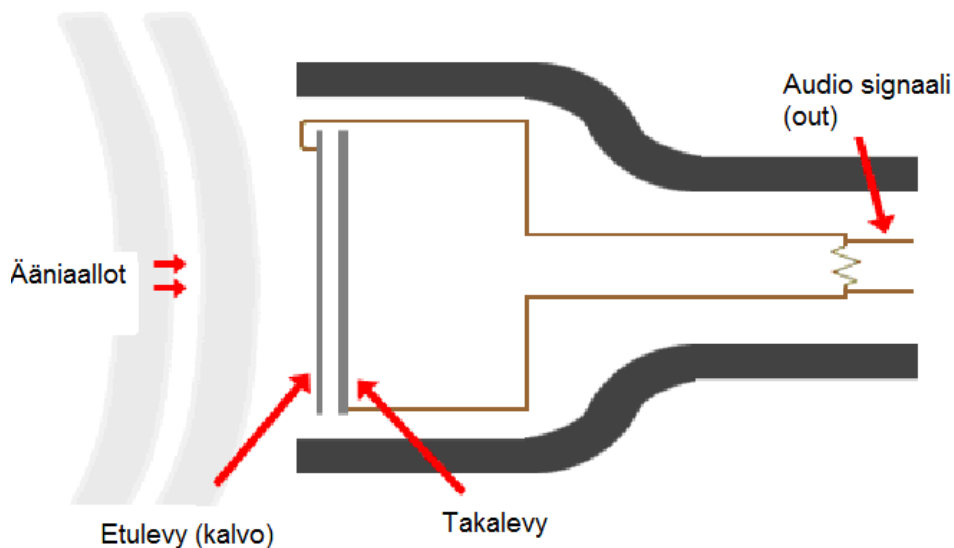
- Kallis
- Käsiteltävä varoen
- Tarvitsee ulkopuolisen virtalähteen
- Herkkyytensä takia ei sovellu käsissä pidettäväksi haastattelumikrofoniksi



Kuva 4. Kondensaattorimikrofonin rakenne. [4]

3.2 Elektreettimikrofoni

Elektreettimikrofoni on kondensaattorimikrofoni, jonka kalvoihin on valmistuksessa saatu jatkuva varaus. Mikrofonin ei tarvitse suurjännitelähdettä ja esivahvistin on sijoitettava aina mikrofonin yhteyteen. Esivahvistin tarvitsee toimiakseen jännitteen, joka tuodaan sille joko erillisenä tai samaa johdinta pitkin äänisignaalin kanssa. Usein jännite saadaan paristosta. Elektreettimikrofonit ovat hyvin edullisia, herkkiä ja ne voidaan valmistaa hyvin pienessä mittakaavassa. Kuvassa 5 on esitetty elektreettimikrofonin rakenne. [2]



Kuva 5. Elektreettimikrofonin rakenne. [5]

4 MARKKINOILLA OLEVAT ÄÄNENTASOMITTARIT

4.1 Yleistä

Markkinoilta löytyy kaikenlaisia äänentasomittareita, jotka eroavat toisistaan erilaisilla toiminnoilla. Suurin osa mittareista on patterilla toimivia, mutta laadukkaammista mittareista löytyy jo akullisia versioita. Hintahaarukka on aika laaja. Bruel & Kjaer on äänentasomittarin valmistajista laadukkain, pitkän kokemuksensa ansiosta. Seuraavaksi esittelen Bruel & Kjaerin kaksi mittaria. Ensimmäinen mittari on perusäänentasomittari tuotannosta ja toinen on kehittyneempien äänentasomittareiden tuotannosta.

4.2 Perusäänentasomittari, tyyppi 2240

Jos työskentelet alalla missä äänen eri korkeusarvot kontrolloivat yhteisöalan mukavuutta tai ammatillista terveyttä perusäänentasomittari on juuri sopiva äänien mittaukseen. Tyyppi 2240 on helppo- ja nopeakäyttöinen. Mittarin etupaneelissa on kolme painonappia, joilla voidaan nopeasti kontrolloida kaikkia 2240:n toimintoja. Virta- ja kalibrointikytkimet löytyvät mittarin sivusta. 2240 on heti mittausvalmis kun mittariin on kytkettynä virta. Mittari on esitelty kuvassa 6. [6]



Kuva 6. Perusäänentasomittari, tyyppi 2240. [6]

Mallissa 2240 koko mittausalue on 30 - 140 dB:n alueella, joka on jaettu kahteen alueeseen: 30 - 110 dB ja 60 - 140 dB. Nämä mittausalueet riittävät varsin hyvin normaaleihin mittauksiin, ja mittausajaksi voi laittaa 1 s:sta jopa 60 minuuttiin. Taajuusalue on 20 Hz:stä 16 kHz:iin asti. Mallissa 2240 on myös LCD-näyttö, josta näkyy kätevästi kaikki tarvittavat mitaustulokset. Mittari toimii kahdella 1,5 V:n LR 6/AA paristoilla, jotka antavat toimiaikaa huoneenlämpötilassa n. 16 tuntia. [6]

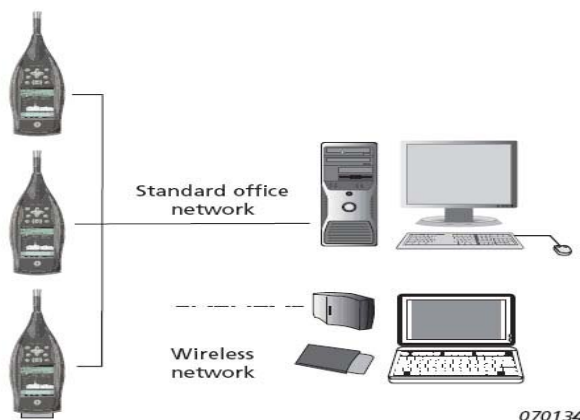
4.3 Kehittyneempi äänentasonmittari, tyyppi 2270

Malli 2270 on suunniteltu kehittyneeksi ratkaisuksi äänien ja värähtelyjen mittauksiin. Malli 2270 on tyyppin 2250 pohjalle rakennettu paranneltu versio.

Mittarista löytyy:

- reaaliaikainen taajuusanalyysi
- kirjautuminen (äänentasoprofiilit)
- äänien ja värähtelyjen nauhoittaminen
- äänien ja värähtelyjen FFT-analyysit
- jälkikaiunta-aikamittaus
- digitaalinen kamera

Helppokäyttöisen käyttöliittymän ja kosketusnäytön ansiosta malli 2270 on luokkansa parhaimmistoa. Malliin 2270 on myös integroitu digitaalinen kamera, jolla voidaan ottaa kuvia mittaustilanteista. Mittarista löytyy ominaisuus, joka mahdollistaa kahden mikrofoniin käytön mittauksissa. Tällä ominaisuudella saadaan mittausaika pienemmäksi ja mahdollisia heijastuksia ja häiriöitä vähemmäksi. Mittariin on myös integroituna LAN- ja USB-rajapinnat, jotka on esitetty kuvassa 7. Tiedon siirtäminen voidaan myös hoitaa langattomasti. Kuvassa 8 on esitetty edellä mainittu mittari. [7]



Kuva 7. Mallin 2270 integroidut LAN- ja USB-rajapinnat. [7]



Kuva 8. Kehittyneempi äänentasonmittari, tyyppiä 2270. [7]

Mallissa 2270 mittausalue on 16,6 desibelistä 140 desibeliin ja mittausajaksi voi valita 1 sekunnista 24 tuntiin. Mittaria kontrolloidaan kätevästi 11 painonapilla ja kosketusnäytöllä. 2270 saa virtansa Li-Ion-akusta, joka antaa mittarille n. 8 tunnin käyttöajan. Mittari sisältää myös 20 Mbitin verran Flash-RAM muistia, johon saadaan tallennettua mittaustulokset kätevästi. Mittarin pohjasta löytyy myös SD/CF-muistikorteille paikat. [7]

5 AKKUTEKNIikka

5.1 Yleistä

Akut ovat sähkökemiallisia energian varastointijärjestelmiä. Akku muuntaa sähkökemiallisessa reaktiossa kemiallista energiaa sähköenergiaksi, jota mitataan wattitunteina (Wh). Akku on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen ja sisältää yleensä useita kennoja. Kennossa olevat kaksi elektrodia on upotettu elektrolyyttiliuokseen. Kun elektrodien välille kytketään ulkoinen resistanssi, tapahtuu akun sisällä sähkökemiallinen reaktio, jonka myötä virta alkaa kulkea ulkoisen kuorman kautta. [8, s. 62.]

Ladattavissa akuissa varaaminen tapahtuu käänteisellä sähkökemiallisella reaktiolla, jossa purkautunut akku ladataan sähkövirran avulla uudelleen. Akkujen vertailussa käytetään yleensä tunnuslukuja energiaa massa- tai tilavuusyksikköä kohti (Wh/kg, Wh/l), tehoa massayksikköä kohti (W/kg) sekä purkaus-latausaikojen maksimimäärää, joka samalla sanelee akun käyttöiän. [8, s. 62.]

Kaksi yleisintä akkutekniikkaa olivat aina 1980-luvulle saakka lyijyakut ja nikkeli-kadmiumakut. Lyijyakkuja käytetään yleensä ajoneuvojen käynnistysakkuina ja silloisten puhelinvaihteiden varavirtalähteinä. Ni-Cd-akkuja käytetään yleensä pienemmissä laitteissa, kuten kannettavissa, työkaluissa ja leluissa. 1990-luvun alussa otettiin käyttöön Ni-MH ja litium-akut. Tämän tyyppisten akkujen energiatiheys on luokkaa 70 - 80 Wh/kg. Litium-akkuja on tutkittu jo 1970-luvulla, mutta ne kärsivät silloin huonosta uudelleenvarauskyvystä. Kuva 9 on erityyppisten akkujen ominaisuuksia. [8, s. 62.]

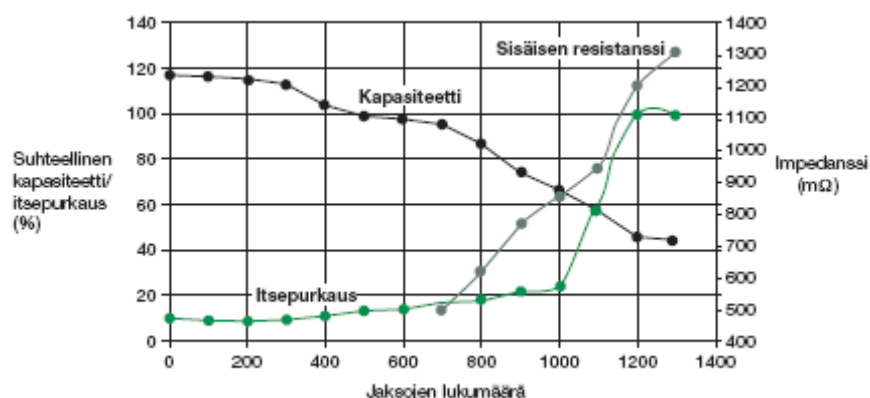
Tyyppi	Kenno-jännite (V)	Energia-massa-suhde (Wh/Kg)	Energia-tilavuus-suhde (Wh/l)	Lataus-jaksojen määrä
Alkali	1,5	150	375	0
NiCd	1,25	45–80	125	1500
NiMH	1,25	60–120	180	500
Litium-ioni	3,6	100	270–325	50–100
Litium- polymeeri	3,7	120–160	230–270	500
Lyijy	2	30	80	200–500
Sinkki-ilma	1,4	300	1150	0
Hopeaoksidi	1,55	130	500	0

Kuva 9. Erityyppisten akkujen ominaisuuksia. [8]

5.2 Ni-MH vastaan Ni-Cd

Metallihybridi-rakenne on syrjäyttämässä kadiumkennot nikkeliakku markkinoilla. Vaikka Ni-MH-akut ovat kalliimpia, ne jyräävät markkinoilla, koska ympäristöystävällisyys on entistä tärkeämpi tulevien ympäristödirektiivien takia. Metallihydridiakut ovat suurempia kapasiteetitilavuussuhteeltaan kuin kadiumkennoakut, mikä näkyy myös suurissa hintaeroissa. Käytännössä Ni-MH-akkujen kapasiteetti on 25 - 30 % suurempi kuin samankokoisen Ni-Cd-akun. [9, s. 36.]

Kestävyydessä Ni-MH-akut häviävät hiukan kadiunkennoakuille. Varauspurkaussyklien toistaminen suurilla virroilla sekä säilyttäminen akkuja korkeissa lämpötiloissa heikentävät metallihybridiakkujen käyttöikää huomattavasti. Kuvassa 10 on kuuden voltin Ni-MH-akun (950 mAh) varauskapasiteetti, itsepurkaus ja sisäinen resistanssi varaus-purkausjaksojen määrän funktiona. [9, s. 36.]



Kuva 10. Ni-MH-akun (950 mAh) varauskapasiteetti. [9]

Nikkeli-metallihybridiakkujen tutkimus alkoi 1970-luvulla. Ne ovat hyvin läheistä sukua Ni-Cd-akuille. Suljetun Ni-MH-kennon rakenne on oikeastaan Ni-Cd- ja NiH_2 -kennoista muodostettu sekarakenne. Anodia lukuun ottamatta Ni-MH-kenno muistuttaa rakenteeltaan melko pitkälti nikkeli-kadiumkennoa. Kennorakenteissa käytettävien yhdisteiden ja reaktioiden tarkasteleminen teoreettiselta puolelta voi olla hankalaa monimutkaisuuden takia. Monet käytettävistä yhdisteistä on optimoitu kokeellisesti. Taulukossa 1 on esitetty Ni-MH-akun kemiallisia reaktioita. [9, s. 36.]

Taulukko 1. Ni-MH-akun kemialliset reaktiot.[9]

Kohde	Reaktio	Jännite
Anodi	$\text{MH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$	0,83 V
Katodi	$\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$	0,52 V
Koko kenno	$\text{NiOOH} + \text{MH} \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{M}$	1,35 V

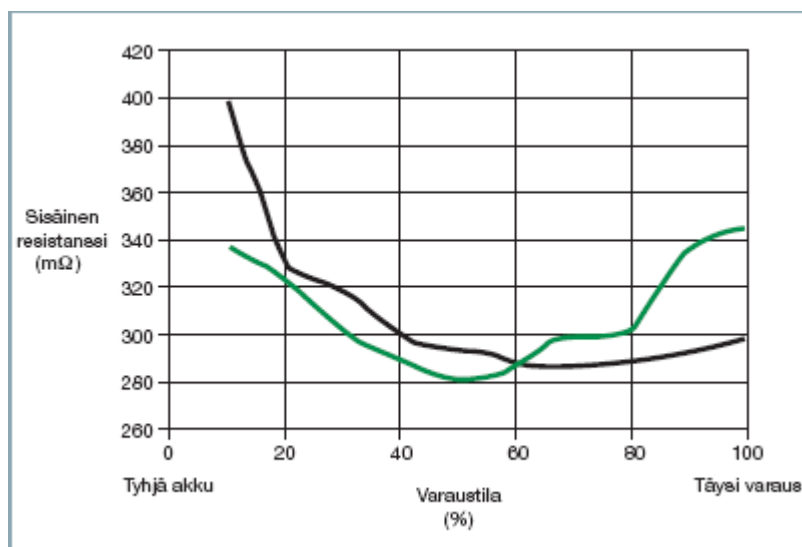
Ni-MH-akun kapasiteetti on aluksi hyvä ja impedanssi pieni, mutta kuormitettavuutta rajoittava sisäinen resistanssi alkaa kasvaa jo muutaman sadan jakson jälkeen, jolloin jännite alkaa vähetä. Vaikka akku kykenee varastoimaan paljon energiaa, niin se ei kykene tuottamaan hetkellisesti suurta tehoa ilman että akkua käyttävän laitteen toimintakyky ei häiriintyisi. Lisäksi on huomioitava valmistajien ilmoittamat akkujen ominaisuudet. Laboratorio-olosuhteissa tehdyt testit antavat yleensä liian optimistisen kuvan akkujen ominaisuuksista. Todellisuudessa purkausjaksoja suoritetaan vain harvoin täydellisesti. [9, s. 37.]

5.3 Akkujen latausprosessi

Ni-MH-akut eroavat Ni-Cd-akuista myös latauksen osalta. Ni-MH-akkujen laturit ovat yleensä älykkäämpiä kuin Ni-Cd-akkujen yksinkertaiset lataussysteemit. Suhteellisen suuren ongelman aiheuttaa Ni-MH-akkujen erittäin pieni jännitteenpudotus akun saavuttaessa täyden varaustilan. Tämän takia sopivan latausalgoritmin löytäminen tunnosta mahdottomalta. Varsinkin kun akkujen ominaisuudet muuttuvat huomattavasti iän, lämpötilan ja varaustilan mukaan. [9, s. 37.]

NDV-menetelmän (Negative Delta Voltage) käyttö ei tulisi kuuloonkaan, sillä jännitteen muutos on todella pieni. Käytännössä jos mittaavan piirin kohinaominaisuudet ja erotuskyky eivät ole huippuluokkaa, sitä ei huomata juuri ollenkaan. Jännitteenmuutos on erityisen pieni silloin, kun latausvirta on alle viisikertainen nimellisvirtaan ($C/10h$) verrattuna ja ympäristön lämpötila on tavallista korkeampi. Lisäksi akun ikääntyminen ja kennojen huonontuminen heikentävät tilannetta entisestään. [9, s. 37.]

Käytännössä laturin tulisi tunnistaa jännitteen muutaman (8 - 16) millivoltin vähennys kennoa kohti. Toisaalta jos laturiin on laitettu liian herkkä latauspiiri, se voi aiheuttaa tilanteen, joka estää akkujen lataamisen maksimivaraustilaan esimerkiksi erilaisten häiriöiden liipaistessa latauspiirin kokonaan sammuksiin. Kuvassa 11 on esitetty Ni-MH-akun sisäisen resistanssin riippuvuus akun varaustilasta. Vihreä viiva kuvaa riippuvuutta jatkuvan purkauksen aikana ja musta viiva tilannetta, jossa purkausjaksojen välillä on neljän tunnin lepotauko. Sisäinen resistanssi on pienimmillään, kun varausaste on n. 50 %. [9, s. 37.]



Kuva 11. Ni-MH-akun sisäisen resistanssin riippuvuus akun varaustilasta. [9]

Useimmissa Ni-MH-akkulatureissa on sisällä useita erilaisia lataustoiminnon ohjausmenetelmiä, kuten NDV-katkaisu, lämpötilan nousuun perustuva katkaisu (dT/dt -menetelmä) ja valikoima erilaisia ajastinkytkimiä. Laturi seuraa kaikkien valvontapiirien tilaa ja katkaisee latauksen, kun jokin näistä saavuttaa vaativan tilan. Joissakin akkulatureissa on sisällä mahdollisuus sekundaarisen purkaustoiminnon käyttöön väsähtäneen kennon elvyttämiseksi. Toiminnon avulla akun varaus puretaan hiljalleen, kunnes akunjännite on laskenut mahdollisimman pieneksi. Purkausvirtaa ohjataan siten, että virta ei koskaan ylitä suurinta sallittua arvoa, kun liikutaan akun normaalia jännitetasoa alempana. Jos napaisuus pääsee kääntymään, virta on niin pieni, että vahinkoa ei pääse tapahtumaan. [9, s. 37.]

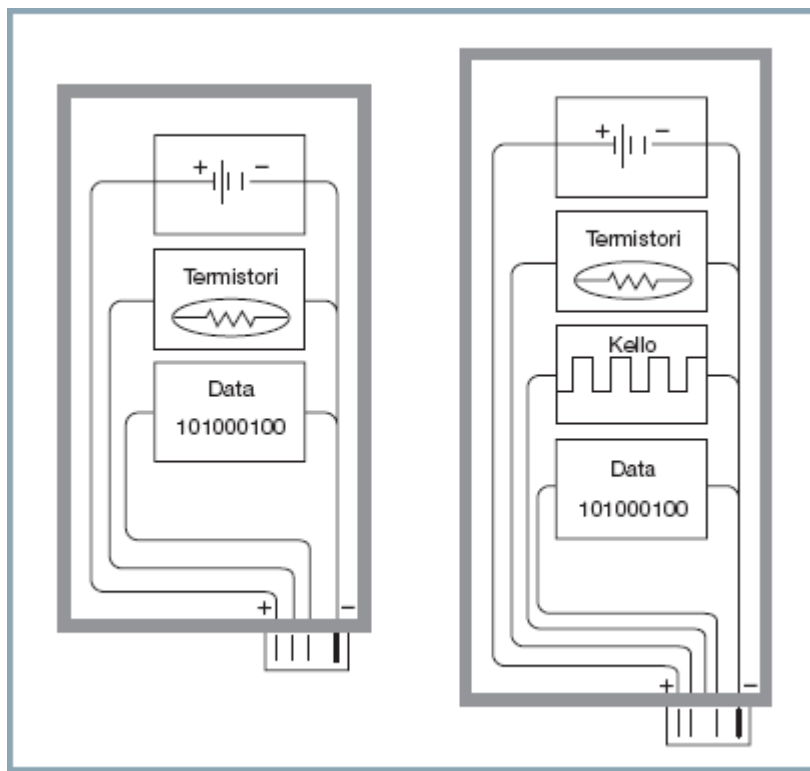
Ni-MH-akut tulisi ladata mieluiten mahdollisimman nopeasti, sillä ne kestävät huonosti ylläladautumista. Mahdollinen ylläpitoladautuminen tulisi hoitaa virralla, joka on noin puolet nimellisvirrasta. Yleensä Ni-Cd-akkujen latureita ei voi käyttää Ni-MH-akkujen lataukseen, mutta Ni-MH-laturia voi käyttää Ni-Cd-akkujen lataukseen. Ni-MH-akkuja ei voi itse asiassa edes ladata hitaasti ns. täyteen, koska lämpötilakäyrissä ei ole riittävän suurta kynnystä akun saavuttaessa täyden varaustilan. Jos latureihin laitetaan osittain tyhjentynyt tai täysi akku, tapahtuu akun ylläladautuminen. Samoin tapahtuu silloin, jos akku on vanha ja varauskapasiteetti on enää puolet alkuperäisestä. [9, s. 38.]

Nikkelipohjaisten akkujen tyypillinen purkausjakson katkaisujännite on noin voltti kennoa kohti. Tällöin akun energiasta on käytetty 99 prosenttia. Tämän jälkeen jännite hupenee hyvin nopeasti, jos purkausta jatketaan. Purkamista alle tämän rajan tulisi välttää varsinkin silloin, kun kuormavirta on suuri, koska vaarana on polariteetin vaihtuminen. Napaisuuden vaihtuminen vastakkaiseksi liittyy akkupaketin kennojen sovituksen epätäydellisyyteen. Ilmiön todennäköisyys on sitä suurempi, mitä enemmän akkuja on sarjassa. Polariteetin vaihtuminen voi vahingoittaa akkua pysyvästi. Jos positiivisella elektrodilla kehittyy vetyä, syntyy paineen kasvua, joka taas johtaa kennon varoventtiilin laukeamiseen. Jos kuormitusta jatketaan, myös negatiivinen elektrodi kääntyy ja syntyy oikosulku ja akku tuhoutuu lopullisesti. [9, s. 38.]

5.4 Uuden akun käyttöönotto ja erilaiset latauspiirit

Uusille nikkelipohjaisille akuille tulisi suorittaa 24 tunnin pituinen ensilataus ylläpitovarauksen tasoisella virralla. Sama pätee myös, jos akku on ollut pitkän ajan käyttämättä. Tämä toimenpide nostaa akkujen varaustason samalle tasolle ja levittää elektrolyytit tasaisesti eristeen pinnalle, jolloin mahdolliset ns. kuivat kohdat saadaan tuhoettua. Edellä mainittu ensilataus tulisi suorittaa pitkään käyttämättä olleille akuille siten, että ensimmäinen varausjakso tehdään hitaasti ja heti sen jälkeen suoritetaan muutamia varauspurkausjaksoja. Jaksojen määrä riippuu varastointilämpötilasta ja ajasta. Uudet nikkelipohjaiset akut saattavat olla tehtaan jäljiltä selvästi vajaatoimisia, jolloin akuille tulisi suorittaa useita latauspurkausjaksoja. [9, s. 39.]

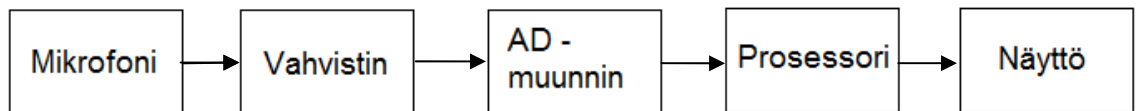
Ni-MH-akkujen lataus edellyttää sopivan latauspiirin käyttöä. Esimerkiksi tyypillinen Ni-MH-latauspiiri on Microchipin SBS-yhteensopiva (Smart Battery System) piiri PS402, joka sisältää kaikki Ni-MH-akkujen lataamiseen tarvittavat toiminnot. Piirissä on mittauslohko, joka yhdistää RISC-pohjaisen prosessorin ja 15-bittisen AD-muuntimen. Piiri kerää tietoa käyttäjille, jonka myötä saadaan latauksesta säädettyä kaikki teho irti. Microchip on kehittänyt erikoistekniikan, joka kattaa kaikki kehittyneimmät akkutyypit ja niiden latausalgoritmit. Tällä halutaan minimoida komponenttien tarve. Akun lämpötilaa voidaan tarkkailla sisäisen lämpötila-anturin avulla tai ulkoisen termistorin avulla. Tietoliikenne hoituu SMBus-liitännän (v1.1) kautta. Piiri voidaan helposti sulauttaa akkupakettiin tai sijoittaa se piirilevylle. Kuvassa 12 on esitetty älyakun sisältöä. Älyakku sisältää yksinkertaisimmillaan (vas.) vain yhden sarjamuotoisen tiedonsiirtojohtoon. Turvallisuuden vuoksi käytetään yleensä erillistä lämpötila-anturijohtoa. Oikealla kaksijohtamiseen SMBus-väylään perustuva rakenne. [9, s. 39.]



Kuva 12. Älyakun sisältöä. [10]

6 ÄÄNTASOMITTARIN TOTEUTUS

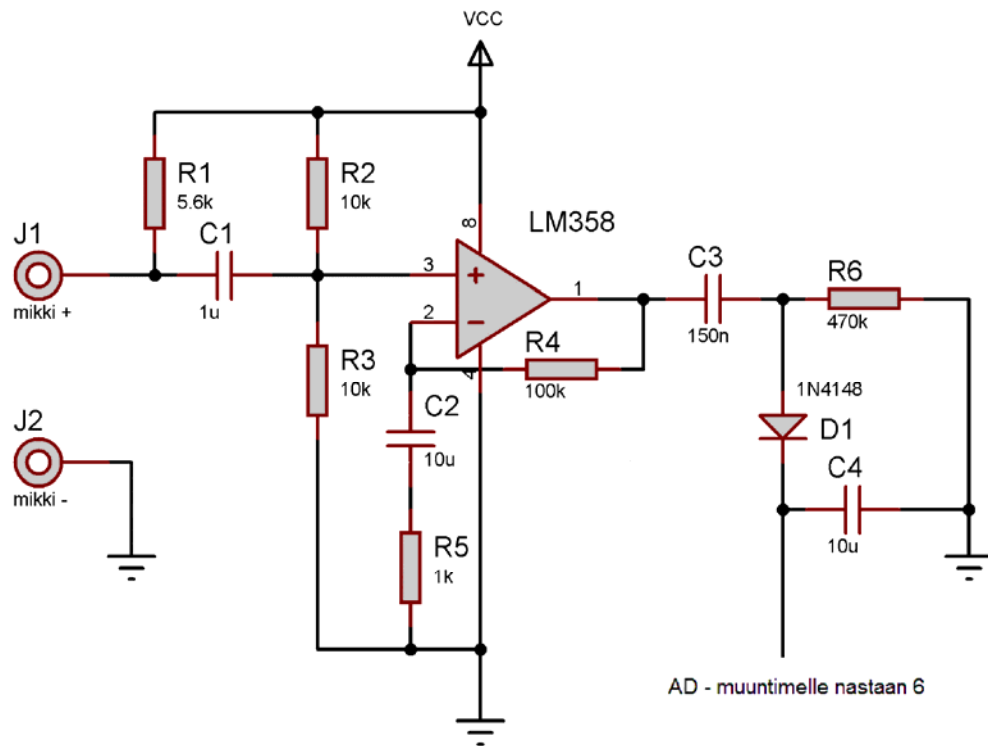
Äänitasomittari koostuu kahdesta osiosta. Ensimmäinen osio sisältää varsinaisen mittarin, jossa on kondensaattorimikrofoni, vahvistin, AD-muunnin ja prosessori. Toinen osio on akkujen lataukseen liittyvä kytkentä. Kuvassa 13 on esitetty äänentasonmittarin lohkokkaavio.



Kuva 13. Äänentasonmittarin lohkokkaavio.

6.1 Vahvistinkytkentä

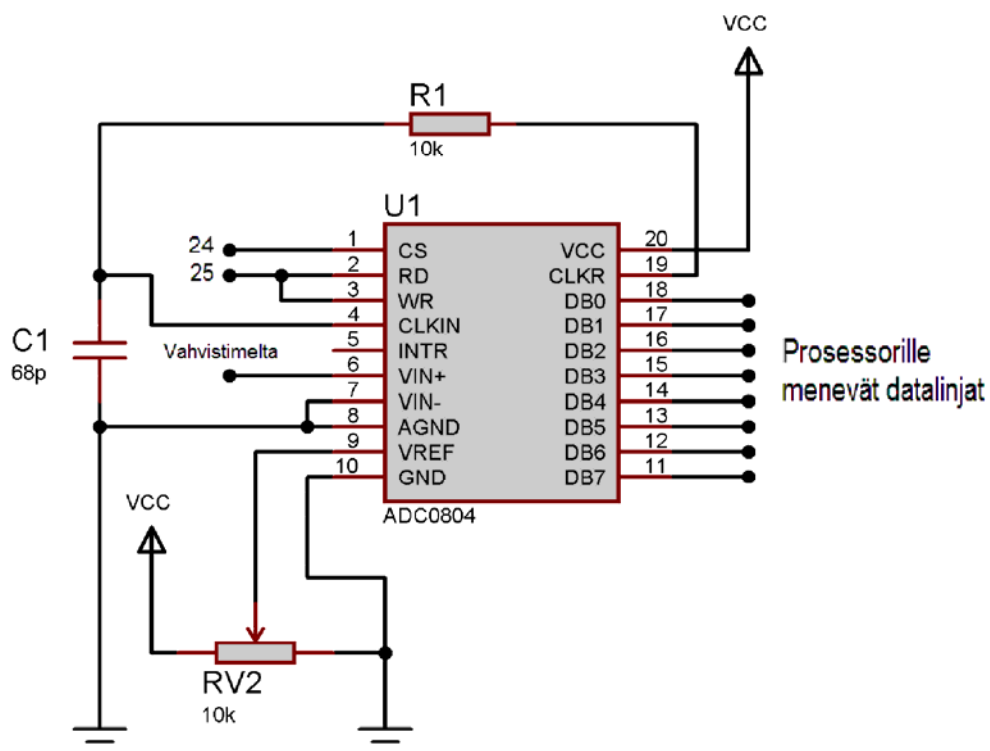
Suora eli ei-invertoiva vahvistinkytkentä on toteutettu LM358-operaatiovahvistimella. Vahvistin vahvistaa mikrofoniin tulevan signaalin muuttamatta signaalin vaihetta. Mittarin mikrofoniina toimii kondensaattorimikrofoni. Vahvistinkytkennässä käytin yksipuolista käyttöjännitettä. Vahvistimen ulostulevasta signaalista poistetaan negatiivinen puoli diodin avulla, ja kondensaattorilla C4 saadaan aikaiseksi pieni viive, jolla hidastetaan signaalin menemistä nolnaan. Signaali johdetaan AD-muuntimelle nastaan 6. Kuvassa 14 on esitetty kyseinen vahvistinkytkentä.



Kuva 14. Vahvistinkytkentä

6.2 AD-muunninkytkentä

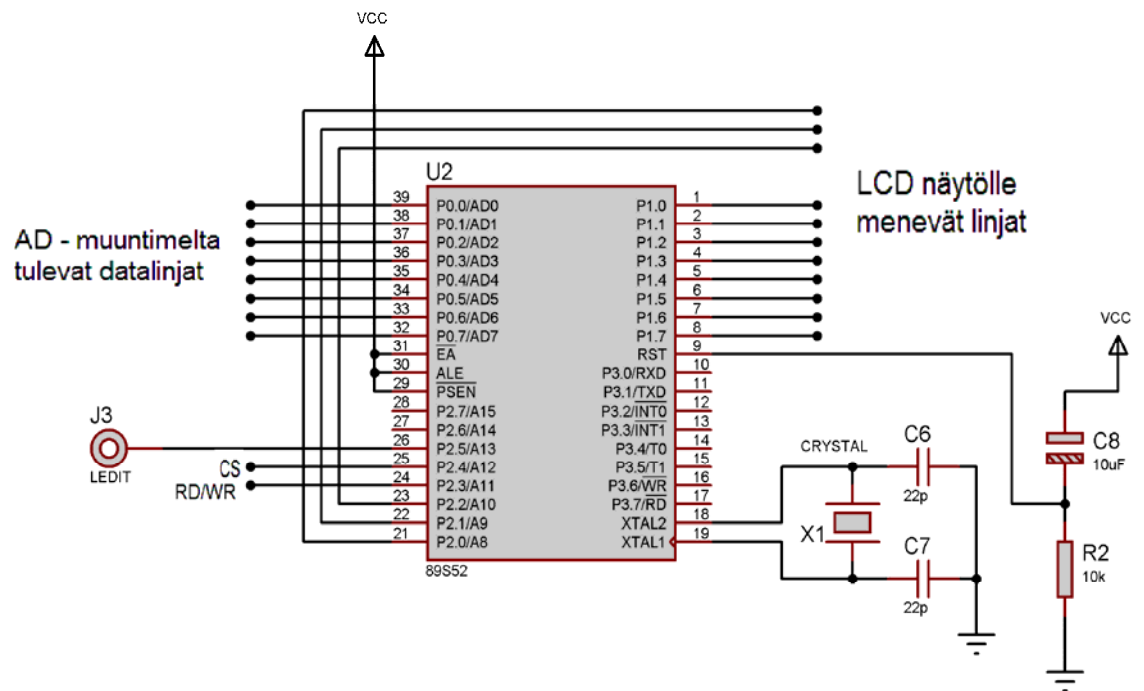
Vahvistimelta tuleva signaali muunnetaan analogisesta digitaaliseksi AD-muuntimen avulla. Kytkenässä käytin ADC0804:sta, joka on varsin yleinen AD-muunnin. Trimmerillä RV2 säädetään mittarin herkkyyttä. AD-muuntimen CS on kytketty prosessorin nastaan 24 ja READ/WRITE-nastat on kytketty prosessorin nastaan 25. Kuvassa 15 on esitetty mittarissa käytettyjä AD-muunnin kytkentöjä.



Kuva 15. AD-muunninkytkenä.

6.3 Prossessorikytkenä, johon on liitettyä ledit

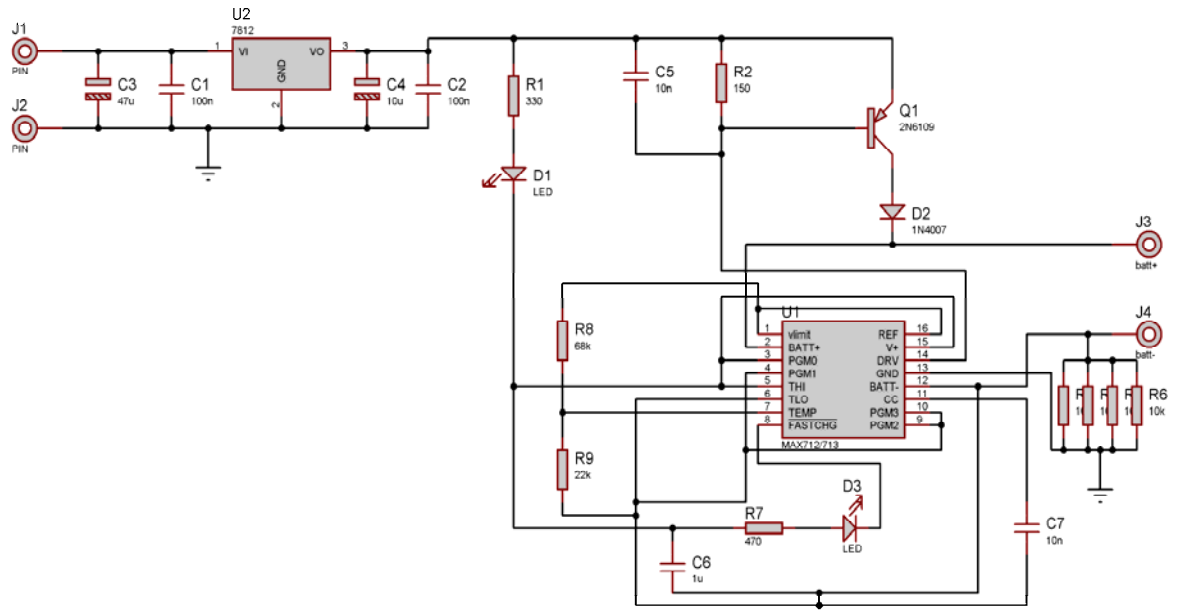
Mittarissa käytin Atmelin 8-bittistä mikroprosessoria AT89S52. Prossessorin nastalla 26 ohjataan ledejä, jotka näyttävät piirilevyjyrsimen käyttäjälle milloin tulisi käyttää kuulosuojausta. Prossessori piirilevy sisältää myös liittimen, johon voi kytkeä LCD-näytön. Kytkenässä käytin 12 MHz:n kidettä, ja resetointi tapahtuu kondensaattorilla C8 sekä vastuksella R2. Kuvassa 16 on esitetty prossessorikytkenä.



Kuva 16. Prosessorikytkentä.

6.4 Laturikytkentä

Mittarissa käytin laturikytkentää, jota ohjataan piirillä MAX712. Laturikytkennässä on 12 V:n regulaattori pitämässä jännitteen sopivana piirille. Mittariin tulee neljä akkua, joten piirin nosta 3 täytyi kytkeä V+:iin ja nosta 4 akun miinukseen. Vastuksilla R6 – R9 rajoitetaan latausvirtaa. Piirilevyllä on kytketty vain R6. Kuvassa 17 on kytkentäkuva kyseisestä laturista.



Kuva 17. Laturikytkentä.

7 PIIRILEVYN SUUNNITTELU JA SYÖVYTYS

7.1 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevyjen suunnittelussa käytin apuna Proteus-ohjelmaa, jossa on ISIS-piirikaavio- suunnitteluohjelma ja ARES-piirilevyjen suunnitteluohjelma. Joitakin komponentteja piti muokata ISIS:n puolella, koska niitä ei löytynyt Proteuksen kotelovalikoimista. Kaikki mittarissa käytetyt komponentit olivat normaaleja läpiladottavia komponentteja. Kotelon suuren koon vuoksi piirilevyistä ei tarvinnut tehdä kovinkaan pieniä, joten suunnittelu helpottui hiukan. Äänitasomittarin piirikaaviokuva on esitetty liitteessä 1, ja laturin piirikaaviokuva on esitetty liitteessä 2.

7.2 Piirilevyn syövytys

Piirilevyjen valmistuksessa käytettiin ns. vanhaa menetelmää, syövyttämistä. Syövyttämällä saadaan aikaan yllättävän tarkkoja levyjä, jos kalvot ovat hyvät. ARES:sen puolella tehdyt kuvat ja niistä tulostetut kalvot ovat onnistuneet hyvin, joten myös lopputulos hyvä. Kalvoja tarvitaan kaksi samanlaista, jotta kuparoinnista tulisi parempi jälki piirilevyille. Kalvot laiteaan tarkasti päällekkäin kalvoissa olevien apurastien avulla. Koska äänentasonmittarin piirilevy on kaksipuolinen, tarvittiin kummallekin puolelle oma kalvo, jotka teipattiin hyvin yhteen.

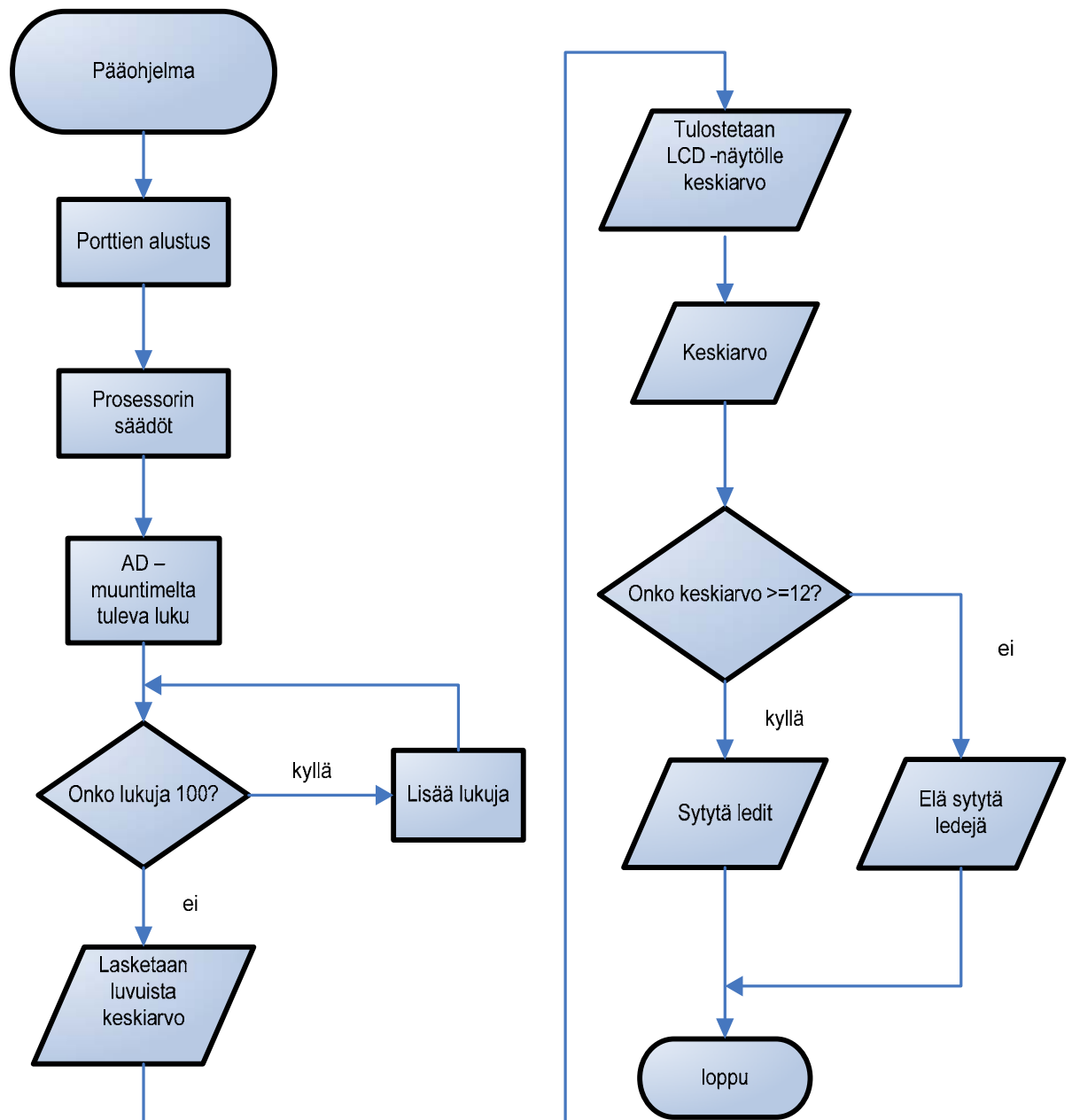
Tämän jälkeen kalvot aseteltiin UV-lakalla päällystetyn kaksipuolisen piirilevyn päälle. Yhdistelmä laitettiin 150 sekunniksi valotuslaitteeseen, jonka avulla saadaan piirilevyn kuva kalvosta. Valotuksen jälkeen piirilevyt laitetaan esisyövytykseen, jossa poistetaan ylimääräinen lakka levystä ja jäljelle jää vain kalvoissa oleva layout-kuva. Tämän jälkeen levyt pitää pestä hyvin veden avulla, että esisyövytyksen vahva emäksinen aine ei neutralisoi varsinaista syövytysainetta. Syövytyksessä piirilevystä syöpyy kaikki muu kupari, paitsi niistä kohti missä on lakkaa. Syövytyksen jälkeen piirilevyjen vedot puhdistetaan teräsvillalla ja lopuksi porataan reiät komponentteja varten. Jos piirilevyllä kulkisi isoja virtoja, tulisi niihin vetoihin laittaa tinaa vahvikkeeksi. ARES:lla suunnitellut layout-kuvat on esitetty liitteessä 3.

8 OHJELMA

Kuvassa 18 on esitettynä pääohjelman vuokaavio. Aluksi ohjelma alustaa LCD-näytölle ja AD-muuntimelle menevät ja tulevat porit, jotta kaikki alkaisi ns. puhtaalta pöydältä joka kerta. Kun ohjelma on alustellut ja hakenut kaikki tarvittavat säädöt prosessorin ohjaukseen, siirrytään ohjelmassa eteenpäin, ikuiseen silmukkaan. Silmukassa ohjelma nollaa AD-muuntimen RD/WR-linjan ja seuraavaksi ohjelma hakee AD-muuntimelta 100 lukua, joista lasketaan sitten keskiarvo. Ohjelma tulostaa LCD-näytölle lasketun keskiarvon. Sitten ohjelma etenee kohtaan, jossa määritellään ledien sytytys. Jos keskiarvo on suurempi tai yhtä suuri kuin 12, ledi ei pala, ja jos on toisin, niin ledi palaa. Jos ledi syttyy, ohjelma pitää sen päällä 6 sekunnin ajan.

Pääohjelman lisäksi ohjelmassa on myös viivealiohjelma ja LCD-näytön ohjaukseen tarvittavat tulostus, alustus ja näyttöaliohjelma. Viivealiohjelmassa aluksi määritellään viiveen pituus, jonka jälkeen käynnistetään laskuri ja odotetaan, milloin ylivuotolippu asettuu ykköseksi. Aliohjelman lopussa laskuri pysäytetään ja lippu nollataan. Alustusliliohjelmassa on 11 alustuskäskyä, joiden avulla näytöstä saadaan alustettua kaikki 11 merkkiä. Tulostus aliohjelmassa käydään läpi kaikki käskyt, joita LCD-näytölle tulostaessa tarvitaan. Aliohjelman alussa LCD-näyttö tyhjennetään, jonka jälkeen käydään läpi rivinvaihtoa sekä kirjaimia ä ja ö koskevat käskyt. Näyttöaliohjelmassa ohjataan LCD-näytölle AD-muuntimelta tulevaa tietoa.

8.1 Vuokaavio



Kuva 18. Pääohjelman vuokaavio.

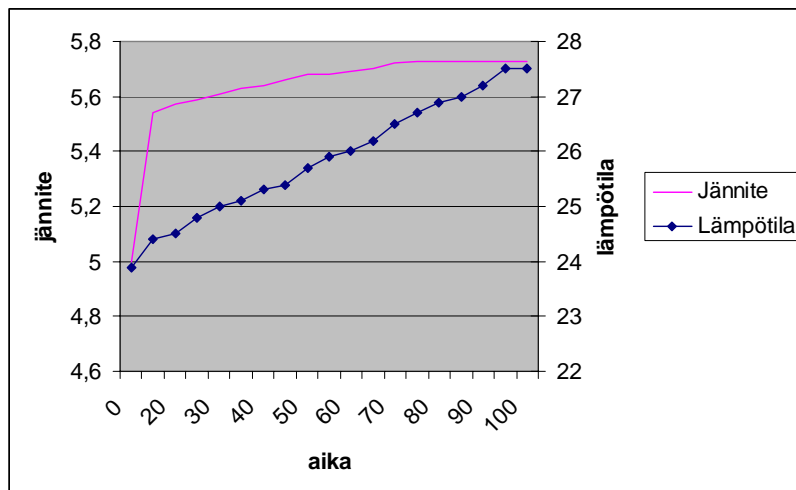
9 TESTAUS

9.1 Äänentasonmittarikytkennän testaus

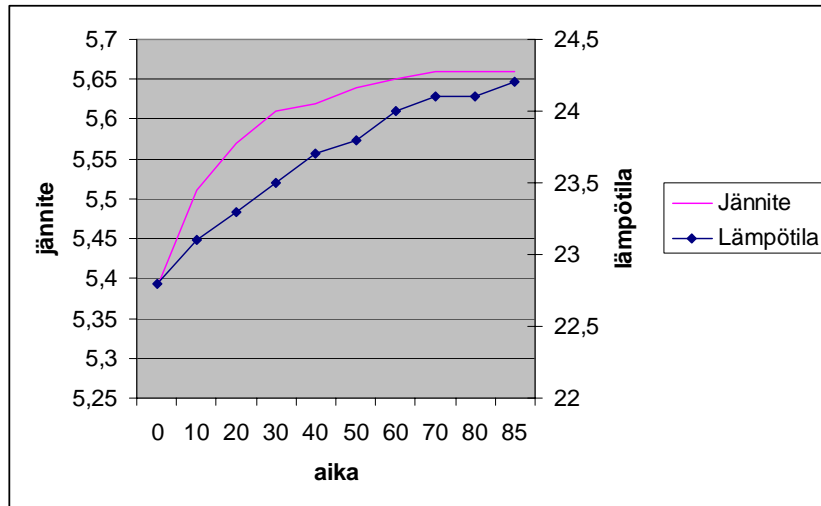
Testasin äänenpainetasomittaria Kajaanin ammattikorkeakoulun tuotantolaboratoriossa olevan CNC-jyrsimen luona. Jyrsimellä oli piirilevyn teko käynnissä. Laitoin mittarin n. 1,5 metrin päähän jyrsimestä. Mukana oli myös koulun digitaalinen äänentasonmittari, jonka avulla saatiin kalibroitu tekemäni mittari. Kalibrointi tapahtui trimmerin RV2:n avulla, joka näkyy liitteessä 1. Digitaalinen äänentasonmittari näytti 72 dB:n määrää silloin, kun pelkkä jyrsin oli päällä, mutta imurin käyntiin laittaminen nosti desibelien määrän kokonaisuudessaan 83 dB:iin. Mittari on nyt säädetty siten, että se ei reagoi alle 82 dB:n.

9.2 Laturikytkennän testaus

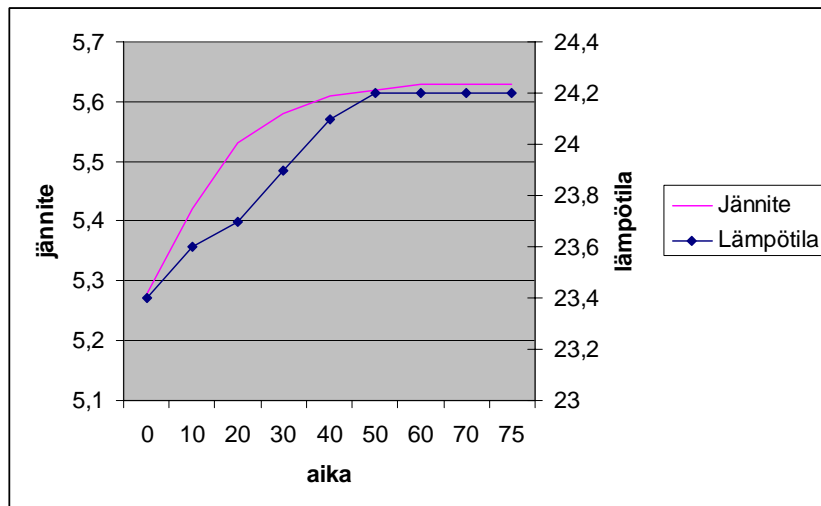
Laturia testasin siten, että latasin akkuja ja purin ne uudestaan ja uudestaan. Laturin latausvirtaa saadaan säädettyä laittamalla lisää vastuksia kohtiin R3, R4, R5 ja R6. Äänentasonmittarissa on nyt paikoillaan yksi yhden ohmin vastus, jolla saadaan 20 mA:n latausvirta. Kuvissa 19, 20 ja 21 näkyy testeissä tulokset.



Kuva 19. Laturin testaustulokset.



Kuva 20. Laturin testaustulokset.



Kuva 21. Laturin testaustulokset.

10 LOPPUANALYYSI

Työssä sain rakennettua suunnitelmien mukaisen äänentasomittarin, joka näyttää CNC-jyrsimen käyttäjälle milloin tulisi käyttää kuulosuojausta. Mittarin tuli reagoida, jos melun taso nousee yli 85 dB:n. Pienellä säädöllä mittari saatiin toimimaan halutulla tavalla ja testauksen myötä mittari säädettiin hälyttämään jo 82 dB:ssä, koska jyrsimen luona melu ei nouse yli 83 dB:n. Tavoitteet täyttyivät hyvin.

Insinööriyön suunnittelu ja rakentaminen oli varsin mielenkiintoista ja helppoa. Työ oli kokonaan elektroniikan rakentamista ja hiukan ohjelmointia. Aluksi yritin rakentaa äänentasomittarin ilman prosessoria, mutta viiveiden tekeminen kytkentöihin oli sen verran hankalaa, että päädyin prosessorin käyttöön. Pienenä yllätyksenä tuli mittarin ”näytön” tekeminen, josta jyrsimen käyttäjä huomaa, onko melun taso noussut liian korkealle. Ylitsepääsemätön ongelma ei ollut, mutta lukuisten vaihtoehtojen ja kokeilujen jälkeen tulimme siihen tulokseen, että ”näyttö” tehdään ledeillä. Ohjelman tekemiseen kului tietenkin osa ajasta, mutta aikaisempien kokemusten perusteella ohjelman tekeminen ei tuottanut hirveitä ongelmia.

Kotelointivaiheessa ilmeni, että ledit eivät näy kannesta niin kirkkaasti kuin olin suunnitellut. Jouduin lisäämään kotelon sisälle pienen piirilevynpalasen, johon oli tinattu 2N3906 PNP-transistori ja 1 k Ω :n vastus. Transistorin avulla saadaan ledit palaamaan kirkkaammin ja vastuksella suojataan prosessoria. Piirilevylle saatiin myös kätevästi liitinrima johon kaikki, johdot voi kytkeä.

Jatkokehitystä katsoen äänentasomittarin piirilevylle laitettiin valmiiksi LCD-näytölle liitin, johon sen voi kytkeä kätevästi. Liitteestä 1 näkyy kohta, mihin prosessorin portteihin se tulisi kytkeä. LCD-näyttöä käytin testikytkennöissä ja testauksessa apuna. Ohjelma tulostaa, näytölle AD-muuntimelta tulevien 100 luvun keskiarvon.

11 YHTEENVETO

Insinööriyössä toteutettiin äänentasomittari, joka ilmaisee, milloin melun taso on noussut yli 85 dB:n. Mittari tulee Kajaanin ammattikorkeakoulun tuotantolaboratorioon CNC-jyrsimen luokse. Jyrsimen käyttäjä näkee mittarin kannessa olevien ledien avulla, milloin tulisi käyttää kuulosuojausta.

Äänentasomittari koostuu kahdesta osiosta. Ensimmäinen on varsinainen mittari ja toinen laturi. Ensimmäisessä osiossa mikrofonilta tuleva signaali vahvistetaan LM358 operaation vahvistinkytkennällä. Vahvistimen ulostulevasta signaalista poistetaan negatiivinen puoli diodin ja kondensaattorin avulla saadaan aikaiseksi pieni viive, jolla saatiin hidastettua signaalin menemistä nollaan. Tämän jälkeen signaali johdetaan AD-muuntimelle, joka muuntaa signaalin digitaalseksi. AD-muuntimelta lähtevä digitaalinen signaali menee mikrokontrolleille. Mikroprosessorina käytettiin Atmelin 8-bittistä AT89S52:sta. Prosessorin sisälle on tehty ohjelma, joka kerää AD-muuntimelta 100 lukua, joista lasketaan keskiarvo. Keskiarvon perusteella ohjelma ohjaa ledejä. Toisessa osiossa on normaali laturikytkentä, joka on toteutettu MAX712-laturipiirin ympärille tehdyllä kytkennällä.

Testauksessa huomasin, että CNC-jyrsimen melu ei nouse yli 83 dB:n. Pelkän jyrsimen ollessa käynnissä melu oli 73 dB, ja imurilisäys nosti melun 83 dB:iin. Säädin mittarin reagoimaan vasta silloin, kun melun taso on noussut yli 82 desibelin. Liitteessä 4 on rakennetun äänentasomittarin kuva lopullisessa muodossaan.

LÄHTEET

- 1 Koivumäki A, Äänikerronta, Painatuskeskus Oy, Helsinki 1993, ISBN 951-37-1096-3
- 2 Heino J, Tietoliikennetekniikka, Kajaanin ammattikorkeakoulu, 2006 opetuskalvot 2 – 8
- 3 Korpinen P ja Kenttämies J, Äänipää 2006, luettu 23.3.2008, http://www.aanipaa.tamk.fi/analog_2.htm#mozTocId773876
- 4 Helsingin yliopisto, Tietokoneavusteinen musiikkitutkimus, luettu 23.3.2008, <http://www.music.helsinki.fi/tmt/opetus/aanitys/luento2/pruju2.html>
- 5 Virtual DJ, luettu 26.3.2008, <http://www.virtualdj.com/blog/xeon/image36.jpg>
- 6 Bruel & Kjael, Products, luettu 22.3.2008 [pdf-dokumentti] <http://www.bksv.com/pdf/Bp2013.pdf>
- 7 Bruel & Kjael, Products, luettu 22.3.2008 [pdf-dokumentti] <http://www.bksv.com/pdf/bp2199.pdf>
- 8 Snellman H, Akkutekniikat osa 1, Prosessori-lehti 4/2005
- 9 Snellman H, Ni-MH syrjäyttää kadiumkennot, Prosessori-lehti 9/2005
- 10 Snellman H, Akkujen lataus, Prosessori-lehti 1/2006

LIITTEIDEN LUETTELO

Liite 1: ÄÄNENTASOMITTARIN PIIRIKAAVIOKUVA

Liite 2: LATURIN PIIRIKAAVIOKUVA

Liite 3: ÄÄNENTASOMITTARIN JA LATURIN LAYOUT-KUVAT

Liite 4: ÄÄNENTASOMITTARIN KUVA

